

## Avaliação do Ciclo de Vida de painéis produzidos a partir de resíduos da cana-de-açúcar.

### **Maria Fernanda N. Santos**

Arquiteta, MSc, Profa. Dep. Arquitetura e Urbanismo  
Univ. Sagrado Coração - USC (Bauru, São Paulo)  
[mfnsantos@yahoo.com.br](mailto:mfnsantos@yahoo.com.br)



### **Rosane A. G. Battistelle**

Engenheira Civil, PhD, Profa. Dep. Eng. Civil  
Univ. Estadual Paulista - UNESP (Bauru, São Paulo)  
[rosane@feb.unesp.br](mailto:rosane@feb.unesp.br)



### **Humberto S. A. Varum**

Engenheiro Civil, PhD, Prof. Dep. Eng. Civil  
Univ. Aveiro - UA (Aveiro, Portugal)  
[hvarum@ua.pt](mailto:hvarum@ua.pt)



**Palavras-chave** - Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Painéis. Bagaço de cana-de-açúcar.

**Keywords** - Life Cycle Assessment (LCA). Panels. Sugarcane bagasse.

### **RESUMO**

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta cada vez mais importante nos processos de tomadas de decisão em empresas do mundo todo e, sua aplicação no setor da construção também apresenta uma série de benefícios, como a possibilidade de melhorias ambientais e econômicas nos produtos. Assim, o que será apresentado neste trabalho, é justamente a aplicação desta ferramenta nos painéis de vedação habitacional compostos de bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) que vêm sendo desenvolvidos pela Universidade Estadual Paulista - UNESP Bauru. O estudo foi desenvolvido com base nas orientações metodológicas da série de Normas NBR ISO 14040 (2009), a unidade funcional adotada foi o m<sup>2</sup> dos painéis e, para a avaliação dos impactos foi empregado o método EDIP. De acordo com os resultados, a ACV possibilitou caracterizar os principais impactos ambientais decorrentes da produção destes painéis para uso habitacional, relacionados ao consumo de recursos, energia e emissão de poluentes. Além disso, a ACV também foi de grande valia na identificação dos pontos positivos e negativos do sistema de produto, possibilitando operar melhorias no processo produtivo dos painéis.

### **ABSTRACT**

Life Cycle Assessment (LCA) is an increasingly important tool in the decision processes of many companies worldwide, and its application in the construction sector also presents benefits, such as the possibility of developing environmental and economic improvements to the products. Thus that, what will be presented in this paper, is the application of this tool in residential panels composed of bagasse from sugar cane (*Saccharum spp*), which are being developed by the Universidade Estadual Paulista - UNESP Bauru. The study was developed based on the methodological guidelines of the standards series ISO 14040 (2009), the functional unit was the panels square meters and for the impact assessment the EDIP method was employed. According to the results, the LCA has enabled characterization of the main environmental impacts from the production of panels for residential use, related to resource consumption, energy and emissions. Furthermore, the LCA was also valuable in identifying strengths and weaknesses of the product system, allowing operating improvements in the productive process of the panels.

## 1. Introdução

A construção civil é um dos maiores setores impulsionadores da economia em todo o mundo. Na Europa, o setor responde por 10-11% do Produto Interno Bruto (PIB), nos Estados Unidos por 12% e, nos países “em desenvolvimento” a cadeia da construção geralmente representa 2-3% do PIB. No Brasil atualmente, estima-se que 9% do PIB esteja vinculado ao setor. Além disso, a construção civil contribui com 7% dos empregos no mundo, dispondo de aproximadamente 111 milhões de postos de trabalho (UNEP, 2003).

Por apresentar um impacto tão significativo na economia global, a construção civil também responde por um grande potencial de modificação do ambiente, pois, para poder produzir os maiores bens em escala do planeta, o setor é responsável pelo consumo de 40% de todos os materiais produzidos no mundo; 40% do total de energia gerada; 17% da água potável disponível e 25% de toda a madeira produzida (ATHENA, 2000). Além disso, o setor ainda responde por números elevados de emissão de resíduos e desperdício de materiais. Segundo as estatísticas do International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), a construção civil é responsável por 40% de todo o lixo produzido pela humanidade (CIB, 1999).

Desse modo, em virtude da pressão exercida pelos diversos segmentos da sociedade, para que o setor da construção civil se torne ambientalmente mais adequado, muito tem se discutido a respeito do aproveitamento de resíduos na produção de materiais de construção e uma infinidade de pesquisas vem sendo desenvolvidas com este objetivo. Porém, antes que estes produtos possam ser chamados de “sustentáveis” e que efetivamente um sistema de reciclagem seja implantado, é imprescindível que se compreendam todas as consequências envolvidas nesta ação e, principalmente, quais os reais ganhos para o ambiente (e para o setor) se isto ocorrer.

Para que se possa obter um quadro geral dos impactos ambientais associados a estes produtos, uma das ferramentas mais utilizadas é a Avaliação do Ciclo de Vida, que vem sendo cada vez mais aceita como resposta às indagações ambientais do novo milênio.

## 2. Metodologia

Para a realização da Avaliação de Ciclo de Vida dos painéis para vedação compostos de bagaço de cana-de-açúcar, foi utilizada a metodologia descrita pela série de Normas ISO 14040, que atualmente é a mais aceita internacionalmente na condução de estudos desta finalidade.

De acordo com a Norma NBR ISO 14040 (2009), que regulamenta os princípios e estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil, a realização de um estudo desta natureza deve compreender quatro fases distintas:

- **Fase 1:** Definição de objetivo e escopo;
- **Fase 2:** Análise de inventário de ciclo de vida;
- **Fase 3:** Avaliação de impacto do ciclo de vida;
- **Fase 4:** Interpretação do ciclo de vida.

### 2.1. Materiais

Para a produção dos painéis avaliados neste estudo, foram utilizados os seguintes materiais:

- Matéria-prima (partículas): Bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*);
- Adesivo (utilizado para a aglomeração das partículas): resina uréia-formaldeído (UF);
- Aditivo (utilizado para diminuir a absorção de água dos painéis): emulsão de parafina;
- Catalisador (utilizado para iniciar o processo de cura do adesivo): sulfato de amônio.

Neste trabalho, o bagaço da cana utilizado provém da Usina Paraíso Bioenergia, localizada no município de Torrinha (estado de São Paulo, Brasil) e foi doado pela empresa para a pesquisa. O bagaço é resultado das atividades da usina, que produz açúcar cristal e álcool combustível e industrial. A cana utilizada na usina é proveniente de fazendas cultivadas na região e passa pelos seguintes processos até a produção do bagaço: colheita da cana, transporte das plantações até a usina, lavagem da cana, picador, desfibrador e moagem.



Figura 1 – Bagaço da cana-de-açúcar

### 3. Desenvolvimento

#### 3.1. Definição de objetivo e escopo

- **Objetivo:**

Levantar os principais aspectos e impactos ambientais relacionados à produção, ainda em fase laboratorial, dos painéis compostos de bagaço de cana-de-açúcar, visando aferir os pontos positivos e negativos de cada processo, possibilitando desse modo, operar melhorias.

- **Escopo:**

A unidade funcional adotada é de 1 m<sup>2</sup> dos painéis de vedação compostos de bagaço de cana-de-açúcar, considerando seu ciclo de vida por um período médio de 8 anos. O sistema de produto avaliado corresponde ao processo produtivo dos painéis, incluindo: a aquisição dos materiais (insumos e matérias-primas), a produção dos painéis, seu uso (como forro interno de um edifício) e a disposição final dos resíduos. Por se tratar de um estudo realizado durante a fase de projeto do produto, é importante lembrar que os dados utilizados para a elaboração deste estudo são apenas indicadores, pois se referem tão somente à execução do processo em escala laboratorial.

#### 3.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida

Para a realização do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dos painéis compostos de bagaço de cana-de-açúcar, algumas considerações e suposições tiveram que ser adotadas. A partir destes pressupostos, foram efetuados os cálculos para cada entrada e saída do sistema de produto dos painéis avaliados, sendo que os procedimentos realizados estão descritos nos próximos itens.

- **Consumo de recursos renováveis e não-renováveis:**

Com vistas a calcular o consumo de recursos renováveis e não-renováveis no sistema de produto avaliado, utilizou-se o Balanço de Massas. Dessa maneira, tudo que entra no sistema (matérias-primas e insumos) e tudo que sai do sistema (produtos e resíduos) deve ser convertido em grandezas possíveis de mensurar, como por exemplo, em massa. Para este cálculo, utilizaram-se dados provenientes de fontes primárias, ou seja, medições *in loco*.

- **Consumo de recursos energéticos:**

Com relação aos recursos energéticos, podem ser citadas duas importantes entradas no sistema: o consumo de energia calorífica (durante a aquisição dos materiais para a produção dos painéis, em função da queima de combustíveis no transporte) e o consumo de energia elétrica (principalmente durante a produção dos painéis, em função do uso de equipamentos). Para o cálculo do consumo de energia calorífica, utilizaram-se dados provenientes de fontes bibliográficas, ou seja, estimados por meio de literatura. Já para o cálculo do consumo de energia elétrica foram realizadas medições *in loco* nos equipamentos utilizados na produção dos painéis, por meio de um analisador de grandezas elétricas, modelo “SAGA 4.000” que aferi a tensão, a corrente, a potência ativa, a potência reativa, a potência aparente e o fator de potência.

- **Emissões para o ar:**

Com relação às emissões para o ar, podem ser citadas duas importantes saídas no sistema de produto dos painéis: as emissões de gases provenientes do transporte (em função da queima de combustíveis fósseis) e a emissão de formaldeído (em função do uso da resina UF). Para o cálculo de ambas as emissões, utilizaram-se dados provenientes de fontes bibliográficas, ou seja, estimados por meio de literatura.

- **Emissões para a água e para o solo:**

Assim como no caso do consumo de recursos renováveis e não-renováveis, o cálculo das emissões para a água e para o solo foi baseado no Balanço de Massas. Para este cálculo, utilizaram-se dados provenientes de fontes primárias, ou seja, medições *in loco*: foram aferidas as massas dos resíduos gerados pelo processo produtivo dos painéis e então estimadas as porcentagens de matéria-prima e insumo presentes nestes resíduos.

Os resultados do ICV estão dispostos na Tabela 1.

Etapa 1: Aquisição dos insumos e matérias-primas						
Entradas	Consumo de recursos Renováveis (g)		Consumo de recursos Não-renováveis (g)		Consumo de recursos Energéticos ( kWh)	
	Bagaço cana	17115,30	Diesel	893,53	Elétrica - estufa	80,36
					Elétrica - picador	2,84
					Elétrica - moinho	2,48
					Combust - diesel	10,50
	TOTAL	17.115,30	TOTAL	17.115,30	TOTAL	17.115,30
Saídas	Emissões para o ar (g)		Emissões para a água (g)		Emissões para o solo (g)	
	CO	22,03			Resíduos	7335,30
	HC	6,93				
	MP	1,05				
	NO <sub>x</sub>	52,50				
	TOTAL	82,51	TOTAL	0,00	TOTAL	7.335,30
Etapa 2: Produção dos painéis						
Entradas	Consumo de recursos Renováveis (g)		Consumo de recursos Não-renováveis (g)		Consumo de recursos Energéticos ( kWh)	
	Bagaço cana	9780,00	Resina UF	1494,00	Elétrica - balança	0,001
	Água	74,70	Emulsão parafina	149,40	Elét. - encoladeira	0,45
			Sulfato de amônio	22,20	Elétrica - prensa	7,09
			Diesel	5,15	Combust.- diesel	0,06
	TOTAL	9.854,70	TOTAL	1.670,75	TOTAL	7,60
Saídas	Emissões para o ar (g)		Emissões para a água (g)		Emissões para o solo (g)	
	CO	0,12	Resina UF	29,88	Resíduos - cana	877,13
	HC	0,03	Emulsão parafina	2,99	Resina UF	131,31
	MP	0,01	Sulfato de amônio	0,44	Emulsão parafina	13,13
	NO <sub>x</sub>	0,30			Sulfato de amônio	1,95
	TOTAL	0,46	TOTAL	33,31	TOTAL	1.023,52
Etapa 3: Uso e manutenção						
Entradas	Consumo de recursos Renováveis (g)		Consumo de recursos Não-renováveis (g)		Consumo de recursos Energéticos ( kWh)	
			Diesel (caminhões)	14,34	Elétrica - serra	0,11
					Elétrica - furadeira	0,001
					Combust.- diesel	0,17
	TOTAL	0,00	TOTAL	14,34	TOTAL	0,28
Saídas	Emissões para o ar (g)		Emissões para a água (g)		Emissões para o solo (g)	
	Formaldeído	0,60			Resíduos - cana	2439,39
	CO	0,36			Resina UF	365,19
	HC	0,11			Emulsão parafina	36,52
	MP	0,02			Sulfato de amônio	5,43
	NO <sub>x</sub>	0,85				
TOTAL	1,94	TOTAL	0,00	TOTAL	2.846,53	
Etapa 4: Descarte final						
Entradas	Consumo de recursos Renováveis (g)		Consumo de recursos Não-renováveis (g)		Consumo de recursos Energéticos ( kWh)	
			Diesel	113,61	Combust. - diesel	1,33
	TOTAL	0,00	TOTAL	113,61	TOTAL	1,33
Saídas	Emissões para o ar (g)		Emissões para a água (g)		Emissões para o solo (g)	
	CO	2,79			Resíduos - cana	6463,48
	HC	0,87			Resina UF	967,62
	MP	0,13			Emulsão parafina	96,76
	NO <sub>x</sub>	6,65			Sulfato de amônio	14,38
	TOTAL	10,44	TOTAL	0,00	TOTAL	7.542,24

Tabela 1 - Resultado do ICV dos painéis de bagaço de cana-de-açúcar

### 3.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Os requisitos para a realização da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) de um produto, a terceira etapa de uma ACV, estão descritos na Norma NBR ISO 14044 (2009). De acordo com a Norma, a AICV tem como objetivo principal avaliar os resultados do ICV de um sistema de produto e, por meio da modelagem de seus impactos, melhor compreender a sua significância ambiental.

Para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida dos painéis foram consideradas as seguintes categorias de impactos, bem como os respectivos fatores de equivalência:

- **Consumo de recursos renováveis:**

Para o cálculo desta categoria de impactos foram contabilizados o consumo de recursos renováveis, como o bagaço da cana-de-açúcar e a água (apenas a água usada na etapa de produção dos painéis foi considerada). Segundo Ometto (2005), não é preciso utilizar fatores de equivalência nesta categoria, de modo que os valores de consumo são expostos em gramas/m<sup>2</sup>.

- **Consumo de recursos não-renováveis:**

Para o cálculo foram contabilizados o consumo de recursos não-renováveis, como o diesel, a resina UF e a emulsão de parafina (que são produtos derivados do petróleo), além do sulfato de amônio (que contém minerais em sua composição). Segundo Ometto (2005), não é preciso utilizar fatores de equivalência nesta categoria e os valores de consumo são expostos em gramas/m<sup>2</sup>.

- **Consumo de recursos energéticos:**

Para o cálculo foram contabilizados tanto o consumo de energia elétrica (decorrente dos equipamentos usados na fabricação dos painéis), quanto consumo de energia calorífica (decorrente da queima de combustíveis fósseis). Segundo Ometto (2005), não é preciso utilizar fatores de equivalência nesta categoria e os valores de consumo são expostos em kWh/m<sup>2</sup>.

- **Potencial de aquecimento global:**

Para o cálculo foram contabilizadas as emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC). Os valores de emissão destes gases, quantificados no inventário, foram multiplicados pelos fatores de equivalência descritos em Wenzel et al. (1997) e o resultado final é exposto na unidade: gramas CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

- **Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico:**

Para o cálculo foram contabilizadas as emissões de monóxido de carbono (CO) e de formaldeído. Os valores de emissão destes gases, quantificados no inventário, foram multiplicados pelos fatores de equivalência descritos em Wenzel et al. (1997) e o resultado final é exposto na unidade: gramas C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>eq/m<sup>2</sup>.

- **Potencial de acidificação:**

Para o cálculo foram contabilizadas as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). Os valores de emissão deste gás, quantificado no inventário, foram multiplicados pelos fatores de equivalência descritos em Wenzel et al. (1997) e o resultado final é exposto na unidade: gramas SO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

- **Potencial de eutrofização:**

Para o cálculo foram contabilizadas as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). Os valores de emissão deste gás, quantificado no inventário, foram multiplicados pelos fatores de equivalência descritos em Wenzel et al. (1997) e o resultado final é exposto na unidade: gramas NO<sub>3</sub><sup>-</sup>eq/m<sup>2</sup>.

- **Potencial de toxicidade humana:**

Para o cálculo foram contabilizadas as emissões de monóxido de carbono (CO) e de formaldeído. Os valores de emissão destes gases, quantificados no inventário, foram multiplicados pelos fatores de equivalência propostos por Wenzel et al. (1997) e o resultado final é exposto na unidade: m<sup>3</sup> de ar/m<sup>2</sup> (considerando o compartimento ambiental avaliado: somente ar).

Este modelo de caracterização utilizado foi baseado no método *Environmental Development of Industrial Products* (EDIP), apresentado por Wenzel et al. (1997). Dentre os motivos que levaram à escolha deste método, pode ser citado o fato de o método EDIP ser tecnicamente comprovado e internacionalmente aceito na condução de estudos de ACV (OMETTO, 2005).

Neste modelo, Wenzel et al. (1997) apresentam uma extensa classificação das substâncias químicas emitidas pelos produtos e seus impactos potenciais. Desta forma, é realizada a caracterização dos impactos multiplicando-se os dados do inventário pelos respectivos fatores de caracterização, o que resulta em valores e unidades possíveis de comparação.

Os resultados da AICV estão dispostos na Tabela 2.

<b>Categorias de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>ETAPA 1: Aquisição materiais</b>	<b>ETAPA 2: Produção dos painéis</b>	<b>ETAPA 3: Uso e manutenção</b>	<b>ETAPA 4: Disposição final</b>	<b>TOTAL</b>
Consumo de recursos renováveis	g/m <sup>2</sup>	17.115,30	74,70	0,00	0,00	17.190,00
Consumo de recursos não-renováveis	g/m <sup>2</sup>	893,53	1.670,75	14,34	113,61	2.692,23
Consumo de recursos energéticos	kWh/m <sup>2</sup>	96,18	7,60	0,28	1,33	105,39
Potencial de aquecimento global	g CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	64,85	0,33	1,05	8,19	74,42
Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico	g C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/m <sup>2</sup>	0,661	0,004	24,010	0,084	24,76
Potencial de acidificação	g SO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	36,75	0,21	0,60	4,66	42,22
Potencial de eutrofização	g NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> eq/m <sup>2</sup>	70,88	0,41	1,15	8,98	81,42
Potencial de toxicidade humana	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	18.284,90	99,60	7.800.298,80	2.315,70	7.820.999,00

Tabela 2 - Resultado da AICV dos painéis de bagaço de cana-de-açúcar

### 3.4. Interpretação do Ciclo de Vida

Com relação ao processo produtivo dos painéis, observa-se que cada uma das etapas produtivas contribui de modo distinto para aumentar os impactos nas categorias analisadas.

#### ▪ Etapa de aquisição dos materiais:

Pode-se dizer que esta etapa é a principal responsável pelo aumento dos impactos nas categorias de consumo de recursos renováveis, recursos energéticos, potencial de aquecimento global, potencial de acidificação e potencial de eutrofização. Este aumento se deve, principalmente, em função da emissão de gases provenientes da queima de combustíveis fósseis durante o transporte dos materiais para a produção dos painéis compostos de bagaço.

#### ▪ Etapa de produção dos painéis:

Esta etapa é a principal responsável pelo aumento dos impactos na categoria de consumo de recursos não-renováveis, em virtude do uso de insumos de fontes não-renováveis, como os derivados do petróleo (resina UF, emulsão parafina) e/ou contêm minerais (sulfato de amônio).

#### ▪ Etapa de uso dos painéis:

Esta etapa é a principal responsável pelo aumento dos impactos nas categorias de potencial de formação fotoquímica do ozônio, potencial de toxicidade humana e potencial de ecotoxicidade, em função da emissão de formaldeído decorrente do uso da resina UF na aglomeração dos painéis.

#### ▪ Etapa de disposição dos resíduos:

Em contrapartida, esta etapa não apresentou uma contribuição significativa nos impactos ambientais. No entanto, é muito importante destacar que não foram consideradas as consequências ambientais do descarte dos painéis contendo formaldeído, em virtude da escassez de dados a respeito na literatura nacional. Se estes parâmetros fossem considerados, a etapa de disposição final dos painéis com certeza apresentaria um maior potencial de impacto ambiental.

#### 4. Notas finais

Conforme pôde ser observado nos resultados da ACV dos painéis de compostos de bagaço de cana-de-açúcar, existem muitos pontos críticos no processo produtivo onde se podem efetuar melhorias, para melhorar seu desempenho ambiental.

Contudo, em virtude deste estudo de ACV ter sido realizado ainda durante o desenvolvimento dos produtos analisados, se caracteriza como um estudo baseado em suposições e de abrangência limitada. Ainda é preciso salientar, que este estudo limita-se ao processo produtivo dos painéis compostos de bagaço da cana-de-açúcar, de modo que não foram abrangidos pelo trabalho os impactos ambientais provenientes dos sistemas produtivos das matérias-primas e insumos, que poderiam certamente ser objeto de estudo de futuros trabalhos. Desta maneira, o presente trabalho deve ser entendido apenas como um primeiro passo na investigação dos impactos ambientais decorrentes do uso deste resíduo em painéis para vedação habitacional.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que, por meio da concessão de uma bolsa de mestrado à autora Maria Fernanda Nóbrega dos Santos, possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

#### Referências Bibliográficas

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *"NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura"*, Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *"NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações"*, Rio de Janeiro: ABNT.
- ATHENA Sustainable Materials Institute. (1996). *"Sustainable building technical manual: Green building design, construction and operations"*, Produced by Public Technology Inc. - USA Green Building Council.
- CIB International Council for Research and Innovation in Building and Construction. (1999). *"Agenda 21 on Sustainable Construction"*, Rotterdam: CIB.
- Ometto, A. R. (2005). *"Avaliação do Ciclo de Vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia"*, Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- UNEP United Nations Environment Programme. (2003). *"Sustainable building and construction"*, *Industry and Environment*, Paris, v. 26, n. 2-3, abr./set., p. 5-9.
- Wenzel, H.; Hauschild, M.; Alting, L. (1997). *"Environmental assessment of products"*, London: Chapman & Hall, v. 1 e 2.